EIN ELEKTRONENSTRAHL-MIKROSCHREIBER HOHER SONDENSTROMDICHTE UND GROSSER BILDPUNKTZAHL MIT OPTO-ELEKTRONISCHER ANALOGSTEUERUNG

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

dem Fachbereich Physik
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Johann Greschner
aus Schmiedshau

1975

1974

EIN ELEKTRONENSTRAHL–MIKROSCHREIBER HOHER SONDENSTROMDICHTE UND GROSSER BILDPUNKTZAHL MIT OPTO–ELEKTRONISCHER ANALOGSTEUERUNG

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

dem Fachbereich Physik
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Johann Greschner
aus Schmiedshau

1975

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Tag der mündlichen Prüfung:	21. November 1974
Dekan:	Prof. Dr. K. Wildermuth
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. R. Speidel
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. G. Möllenstedt

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	1
1. Gesamtaufbau des Elektronenstrahlmikroschreibers	3
2. Das Prinzip der Elektronenstrahlmikroaufzeichnung mit opto-elektronischer Analogsteuerung	5
3. Die Analog-Steuerung des Mikroschreibers	7
3.1 Der Aufbau der opto-elektronischen Analog-Steuerung	7
3.2 Der Bild-Abtastkopf	8
3.3 Die Umformung des Bildsignales	10
3.4 Die Erzeugung von Austast-, Triggerimpuls und X-Sägezahn	10
3.5 Die Erzeugung des langsamen Y-Sägezahns	11
4. Der Elektronenstrahl-Mikroschreiber	13
4.1 Der Aufbau des Elektronenstrahl-Mikroschreibers	13
4.2 Der Aufbau der Kondensor-Objektiv-Einfeldlinse	15
4.3 Elektronenoptische Betrachtungen zur Kondensor-Objektiv-Einfeldlinse	17
5. Experimentelle Ergebnisse	23
5.1 Experimentelle Bestimmung der maximalen Bildpunkt-zahl des Elektronenstrahl-Mikroschreibers	23
5.2 Experimentelle Bestimmung der maximalen Bildpunkt-zahl des Steuersystems	25
5.3 Anwendungsbeispiele	27
6. Zusammenfassung	35
7. Literatur	37
Schaltbilder - Stücklisten	

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546514_0089

Einleitung

Die Elektronenstrahlmikroschreiber haben in den vergangenen Jahren an Bedeutung zugenommen. Sie werden heute bereits bei der Herstellung von integrierten Schaltkreisen in der Halbleitertechnik eingesetzt. Der eigentliche Mikroschreiber besteht in allen Anordnungen aus einem Elektronenstrahlerzeugungssystem und nachfolgenden Verkleinerungslinsen, die eine feine Elektronensonde erzeugen. Je nach Anwendungsgebiet unterscheiden sich der Durchmesser dieser Sonde sowie das damit beschriebene Bildfeld.

Bei den Steuersystemen sind die Unterschiede grundsätzlicher Art. Die digital-computergesteuerten Systeme (1, 2, 3, 4) haben ihre zu speichernde Information in Form eines Computerprogramms vorliegen. Die Vorteile dieser Steuerung sind neben der relativ einfachen Variationsmöglichkeit des Programms zur Veränderung der Originalinformation die Speicherung sämtlicher Daten, die zur Ablenkung und zur dynamischen Korrektur des Elektronenstrahls im Mikroschreiber notwendig sind.

Der Nachteil der computergesteuerten Systeme ist neben der sehr hohen Kosten, daß die als Programm zu speichernde Originalvorlage nur sehr einfache geometrische Strukturen enthalten darf. Damit bleibt das Anwendungsgebiet der computergesteuerten Mikroschreiber auf die Maskenherstellung von integrierten Schaltkreisen beschränkt.

Bei den analogen Steuersystemen erfolgt die Steuerung und Aufzeichnung im Elektronenstrahlmikroschreiber analog zum Abtastprozeß der Originalvorlage. Die im Mikroschreiber zu speichernde Information liegt als flächenhaftes Bild vor und kann eine beliebig komplizierte Struktur besitzen. Damit sind die analogen Steuersysteme den digital-computergesteuerten bei Problemen der allgemeinen Informationsspeicherung überlegen.

Bei der Flying-spot-Steuerung z. B. (5, 6) muß die Originalvorlage in Form eines Diapositivs vorliegen. Die Bildpunktzahl, die maximal gespeichert werden kann, liegt bei $2 \cdot 10^6$. Die Fernsehsteuerung (7, 8) erfordert den geringsten Aufwand bezüglich der Originalvorlage. Jede Schwarz-Weiß-Zeichnung kann bei diesem Verfahren mit Hilfe einer Fernsehkamera abgetastet werden und gleichzeitig im Mikroschreiber aufgezeichnet werden. Außerdem ist bei diesem Verfahren eine elegante Möglichkeit zur Speicherung von Grauwerten vorhanden (9). Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht in der geringen Anzahl von ca. $4 \cdot 10^5$ speicherbaren Bildpunkten.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Elektronenstrahlmikroschreiber mit einem optisch-mechanischen Steuersystem beschrieben, das eine Bildpunktzahl von ca. $5 \cdot 10^7$ Bildpunkten übertragen kann (10). Dieses Steuerverfahren wird schon seit langem bei der Bildfunkübertragung eingesetzt und ist unter dem Namen Faksimile-Verfahren bekannt. Es wurde hier zur Steuerung des Mikroschreibers abgewandelt und verfeinert. Die Originalvorlage befindet sich dabei auf einer rotierenden Walze und wird mit einem opto-elektronischen Abtastkopf zeilenförmig abgetastet. Das damit gewonnene elektrische Signal steuert einen Elektronenstrahlmikroschreiber, dessen Sonde von ca. 100 nm Durchmesser durch zwei Verkleinerungslinsen erzeugt wird. Als zweite Verkleinerungslinse wird eine Kondensor-Objektiv-Einfeldlinse mit einer Brennweite von 15 mm eingesetzt (11, 12). Die bekannten Vorteile dieser Linse sind ihre kleinen Fehlerkoeffizienten und die dadurch erreichbare hohe Stromdichte in der Sonde.

1. Gesamtaufbau des Elektronenstrahlmikroschreibers

Den Gesamtaufbau des Elektronenstrahlmikroschreibers mit Analogsteuerung zeigt Abb. 1.

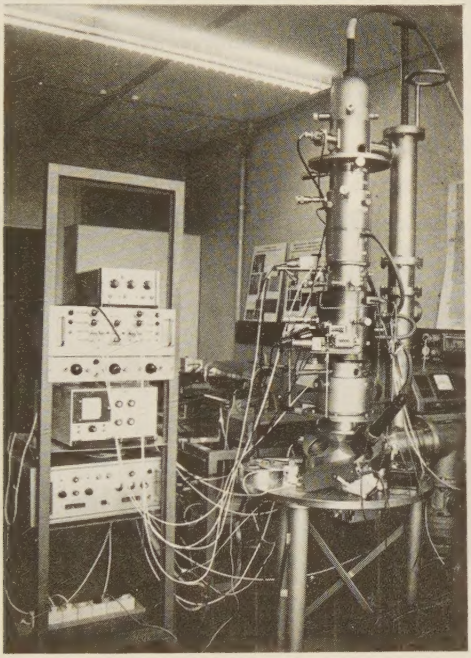


Abb. 1: Gesamtaufbau des Elektronenstrahlmikroschreibers

In der unteren Hälfte der elektronenoptischen Säule befindet sich die KOE-Linse, auf der ein Getriebemotor mit Zählwerk für die mechanische Verschiebung des Objektes zu erkennen ist.

In der Bildmitte befindet sich die Steueranlage mit der Aluminiumwalze. Das Reck am linken Bildrand enthält einen Teil der Steuerelektronik für den Mikroschreiber.

Die Steueranlage ist in Abb. 2 noch einmal detaillierter wiedergegeben. Auf der hochreflektierenden Aluminiumwalze ist eine Originalvorlage aufgespannt. Vor dem linken Rand der Walze befindet sich der bewegliche Abtastkopf für das Bildsignal, am rechten Rand der feststehende Abtastkopf für Austastung und Synchronisierung. Die Antriebsspindel für den Bildabtastkopf ist über einen Zahnriemen und eine elektromagnetische Kupplung an Motor und Getriebe angekoppelt. An das linke Ende der Antriebsspindel ist das 40-Wendel-Potentiometer angekoppelt.

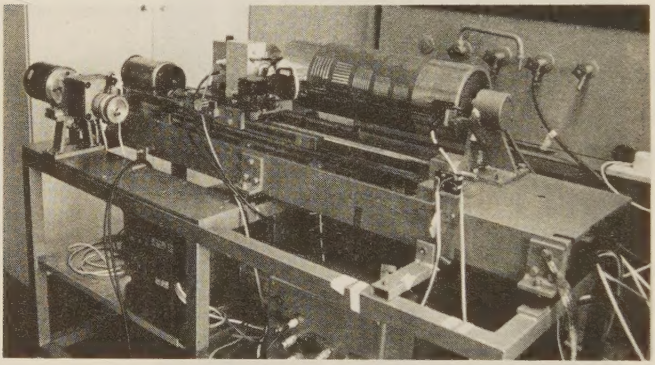


Abb. 2: Die Analogsteuerung des Mikroschreibers

2. Das Prinzip der Elektronenstrahlmikroaufzeichnung mit opto-elektronischer Analog-Steuerung

In Abb. 3 ist der Aufbau des opto-elektronisch gesteuerten Elektronenstrahlmikroschreibers im Prinzip dargestellt. Die zu verkleinernde Originalvorlage ist auf einer Aluminiumwalze befestigt. Ein Abtastkopf, der einen 50 x 50 μm^2 großen Bildpunkt lichtoptisch auf das Fenster einer Fotodiode abbildet, wird mit einer Spindel an der rotierenden Walze vorbeigeführt. Die Walze besitzt eine Länge von 50 cm und einen ebenso großen Umfang, so daß der abgebildete 50 µm-Bereich in einer Zeile 10 000 mal enthalten ist. Die auflösbare Zeilenzahl beträgt dann ebenfalls 10 000. Die flächenhafte Bildinformation wird rasterförmig abgetastet und durch die Fotodiode in ein zeitlich aufeinanderfolgendes elektrisches Signal umgewandelt.

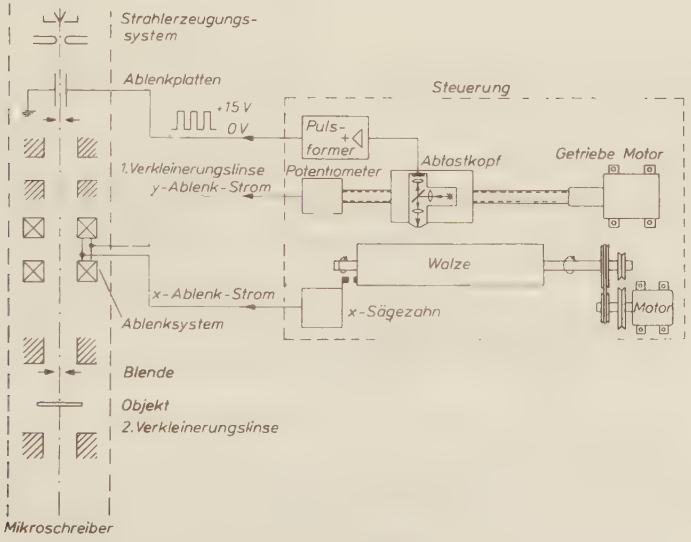


Abb. 3: Das Prinzip der opto-elektronisch gesteuerten Elektronenstrahlmikroaufzeichnung

Das auf diese Weise erhaltene Bildsignal wird verstärkt und so umgeformt, daß es zur Hell-Dunkel-Steuerung des Elektronenstrahles an den Ablenkplatten im Elektronenstrahl-Mikroschreiber ausreicht.

Eine Umdrehung der Walze entspricht der Länge einer Zeile. Synchron zu dieser Walzendrehung müssen die X-Ablenkspulen im Mikroschreiber mit einem sägezahnförmigen Strom gespeist werden. Dieser Stromsägezahn wird ausgelöst durch einen Triggerimpuls, den ein zweiter, feststehender opto-elektronischer Abtastkopf bei jeder Umdrehung der Walze erzeugt.

Die Korrelation zwischen der Bewegung des Abtastkopfes entlang der Walze und einem sägezahnförmigen Strom, der den Y-Ablenkspulen im Mikroschreiber zugeführt werden muß, wird hergestellt durch ein direkt an die Antriebsspindel angekoppeltes Potentiometer, das einen Stromverstärker steuert.

Die Elektronenstrahlsonde wird durch ein Doppelablenksystem rasterförmig über das Objekt geführt, welches sich etwa in der Spaltmitte der Polschuhe der zweiten Verkleinerungslinse befindet. Die Aufzeichnung der Bildinformation, auf Grund der Hell-Dunkel-Steuerung durch die Austastplatten, erfolgt z. B. auf Polymethylmethacrylat (13), einem positiven Electron-Resist, der an seinen belichteten Stellen entwickelt werden kann. Bei diesem Electron-Resist werden die sehr großen Molekülketten von den 50 kV-Elektronen in Bruchstücke zerschlagen, die bei Verwendung eines geeigneten Entwicklers eine höhere Löslichkeit besitzen, als die unbelichteten Stellen.

Die Zeit für eine einmalige Bildabtastung wird von der Empfindlichkeit des verwendeten Electron-Resist und vom Strom in der Sonde bestimmt. In der hier beschriebenen Anordnung waren Registrierzeiten von ca. 5 Minuten erforderlich.

3. Die Analog-Steuerung des Mikroschreibers

3.1 Der Aufbau der opto-elektronischen Analog-Steuerung

In Abb. 4 ist die opto-elektronische Steuerung im Blockschaltbild dargestellt. Die auf eine Walze aufgespannte Originalvorlage wird mit einer Fotodiode zeilenförmig abgetastet. Das dabei entstehende Bildsignal verstärkt ein Breitbandverstärker (B 1) auf 2,5 V_{SS} Amplitude. Der nachfolgende Impulsformer (B 2) verwendet mit Hilfe einer variablen Schwelle einen Bereich von 0,6 V aus dem Bildsignal, um rechteckförmige Impulse zu erzeugen. Diesem umgeformten Bildsignal wird in der Mischstufe (B 3) der Austastimpuls für die Rücklauf-Dunkeltastung zugemischt. In dieser Stufe ist außerdem eine elektronische Schwarz-Weiß-Umkehr des Bildsignales eingebaut. Der Endverstärker (B 4) verstärkt das Bildsignal auf die Amplitude von 15 V_{SS}, die zur Hell-Dunkel-Steuerung an den Ablenkplatten erforderlich ist.

Mit einem zweiten opto-elektronischen Steuerelement (X 1) wird sowohl der Austastimpuls als auch ein Triggerimpuls erzeugt, mit dessen Hilfe im X-Sägezahn-Generator (X 2) der zum Walzenumlauf synchrone X-Sägezahn erzeugt wird. Die Walze kann mit verschiedenen Drehzahlen zwischen 1000 U/min und 3000 U/min betrieben werden. Die dazugehörigen X-Sägezahnfrequenzen liegen zwischen 16 2/3 Hz und 50 Hz. In einem stromkonstanten Verstärker (X 3) wird diese sägezahnförmige Spannung in einen den X-Ablenkspulen angepaßten Stromsägezahn umgewandelt.

Die sägezahnförmige Spannung für die Y-Ablenkrichtung wird über ein hochlineares 40-Wendel-Potentiometer erzeugt. Dieses ist direkt an die Antriebsspindel, welche den Abtastkopf entlang der Walze führt, angekoppelt. Die gesamte Abtastzeit T wird durch die Geschwindigkeit des Abtastkopfes entlang der Walze bestimmt. Über den Zusammenhang

N = T/D , wobei N die Anzahl der Zeilen, T die gesamte Abtastzeit und D die Drehzahl der Walze bedeutet, läßt sich bei einer vorgegebenen Zeilenzahl N und Registrierzeit T die zugehörige Drehzahl D der Walze errechnen. Die Umwandlung in einen Stromsägezahn erfolgt in einem stromkonstanten Verstärker (Y 1).

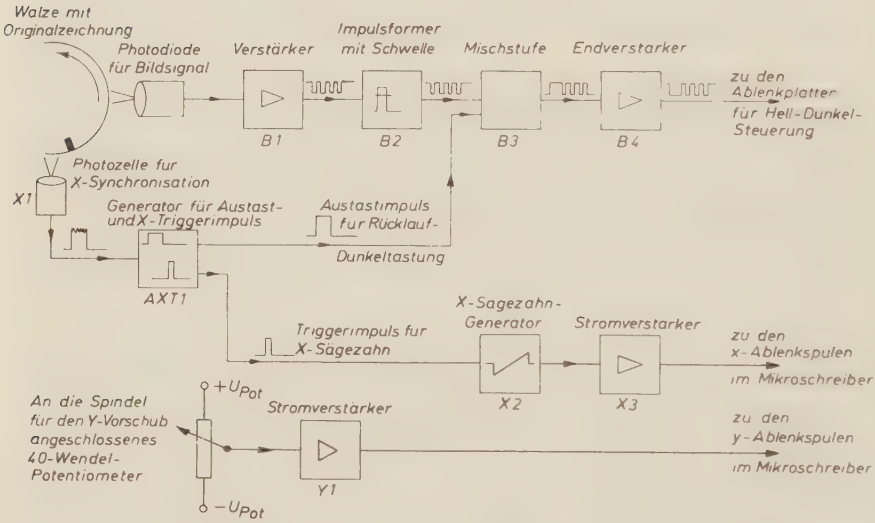


Abb. 4: Prinzip der opto-elektronischen Steuerung

3.2 Der Bild-Abtastkopf

Der in Abb. 5 dargestellte Abtastkopf besteht aus einer Auflicht-Optik der Fa. Leitz, die mit einem Objektiv 25 x/ 0.50 bestückt ist. Als Lichtquelle wird eine Halogen-Glühlampe 12 V 100 Watt benutzt, die zur Vermeidung von Intensitätsschwankungen aus einer Gleichspannungsbatterie versorgt wird.

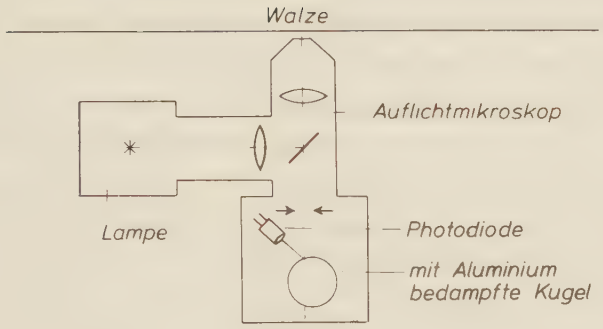


Abb. 5: Prinzip des opto-elektronischen Abtastkopfes

Die lichtoptische Anordnung muß einen Bereich von 50 x 50 μm^2 der Originalvorlage auf das 5 x 5 mm^2 große Fenster der Fotodiode abbilden. Dies wird mit einem einstufigen Lichtmikroskop und einer mit Aluminium bedampften hochreflektierenden Kugel, die als Vergrößerungslinse wirkt, erreicht.

Da die Zeit zur Abrasterung des kleinsten Bildpunktes bei einer Walzendrehzahl von 3000 U/min nur 2 µs beträgt, muß das verwendete Fotoelement wesentlich kürzere Anstiegszeiten besitzen. Die Fotodiode vom Typ BPY 13 A der Fa. Valvo mit einer Anstiegszeit von 2 ns bei optimalen Betriebsbedingungen erfüllte diese Bedingung hinreichend. Die Fotodiode wird hier mit einer Sperrspannung von 15 V und einem Arbeitswiderstand von 10 KOhm betrieben. Das Nutzsignal, das am Eingang des Breitband-Verstärkers (B 1) zur Verfügung steht, wenn als Originalvorlage die rotbeschichtete Mylar-Folie verwendet wird, beträgt 5 mV_{SS}. Bei den anderen Vorlagen, bei denen sich eine schwarze Schicht auf der transparenten Trägerfolie befindet, steht ein Nutzsignal von 10 mV_{SS} zur Verfügung.

3.3 Die Umformung des Bildsignales

Der Arbeitswiderstand der Fotodiode von 10 KOhm (R 1 auf Schaltbild B 1 im Anhang) stellt gleichzeitig den Eingangswiderstand des mit 2 Operationsverstärkern vom Typ CA 3030 bestückten zweistufigen Breitbandverstärkers dar. Die Verstärkung beträgt V = 500. Damit steht am Ausgang dieses Verstärkers ein Bildsignal von 2,5 V_{SS} zur Verfügung. Mit diesem Signal wird in der Impulsformerstufe (B 2) ein pnp-Transistor vom Typ 2 N 2905 angesteuert. Mit dem Kollektorwiderstand P 1 wird der Arbeitspunkt des als Schalter arbeitenden Transistors T 2 so eingestellt, daß der gewünschte Teil des Bildsignales für die Hell-Dunkel-Steuerung wirksam wird. Das Signal am Kollektor von T 2 besitzt eine Amplitude von 15 V_{SS}. Es wird durch den Spannungsteiler im Emitterzweig des Transistors T 3 zur Anpassung an die nachfolgende logische Schaltung auf eine Amplitude von 5 V_{SS} geteilt.

In der Umkehr- und Mischstufe (B 3) kann das Signal mit Hilfe des Schalters S 1 und des NICHT-Gliedes N 1 invertiert werden, was einer Schwarz-Weiß-Umkehr des Bild-Signales entspricht. Der Austastimpuls wird in dieser Stufe nach einer Amplitudenanpassung und Invertierung dem Bildsignal im UND-Glied N 3, N 4 zugemischt. Am Ausgang von B 3 steht das Bild-Austast (BA)-Signal in einer Größe von 5 V_{SS} zur Verfügung. Im Endverstärker (B 4) wird dieses Signal durch den als Schalter arbeitenden Transistor T 1 auf die für die Hell-Dunkel-Steuerung erforderliche Spannung von 15 V_{SS} verstärkt.

3.4 Die Erzeugung von Austastimpuls, Triggerimpuls und X-Sägezahn

Beim Aufspannen der Originalvorlage auf die Walze ergibt sich, wenn die Vorlage kürzer ist als der Walzenumfang, ein Leerbereich, der nicht übertragen werden soll. Von diesem Bereich erzeugt ein zweiter

opto-elektronischer Abtastkopf den Austastimpuls. Die Rückflanke des Austastimpulses dient zur Erzeugung eines Triggerimpulses, der den X-Sägezahn für die Ablenkspulen im Mikroschreiber auslöst. Damit ist die Synchronisierung zwischen Walzenumlauf und X-Ablenksägezahn im Mikroschreiber gewährleistet.

Im Abtastkopf zur Erzeugung des Austastimpulses wird mit Hilfe einer Sofitten-Lampe und einer Zylinderlinse ein feiner Strich auf den Rand der Walze abgebildet. Dort ist der Bereich, der keine Information enthalten soll, im Gegensatz zu der übrigen hochreflektierenden Aluminiumoberfläche der Walze, schwarz. Das von der Walze reflektierte Licht trifft auf den Fototransistor BPX 28 (siehe Schaltbild X 1), an dessen Ausgang ein rechteckförmiges Signal mit Anstiegszeiten von 2 µs und einer Amplitude von 1,5 V_{SS} zur Verfügung steht.

Im Generator für Austast- und Triggerimpuls (AXT 1) verstärkt der als Schalter arbeitende Transistor T 2 dieses Signal auf eine Amplitude von 15 V_{SS}. Über die Diode D 2 wird das Monoflop (T 4 / T 5) angesteuert, das den Austastimpuls erzeugt. Durch das Differenzierglied (R 6 /C 1) und die Diode D 1 wird erreicht, daß nur die Rückflanke dieses Signals das Monoflop (T 7 / T 8) ansteuert. Dies erzeugt den Triggerimpuls von ca. 10 µs Pulslänge, der im nachfolgenden X-Sägezahn-Generator (X 2) den Spannungssägezahn auslöst. Der Generator (X 2) ist aus der Modul-Baureihe 120 der Fa. Wavetek aufgebaut. Die Linearität des Sägezahns ist besser als 0,1 %. Im Endverstärker (X 3), der durch Rückkopplung der Spannung am Meßwiderstand R 16 auf den OP-Eingang als "Stromquelle" arbeitet, wird dieser Sägezahn den Ablenkspulen angepaßt.

3.5 Die Erzeugung des langsamen Y-Sägezahns

Der opto-elektronische Abtastkopf zur Erzeugung des Bildsignales befindet sich auf einem Schlitten, der durch eine Spindel angetrieben wird.

Die Spindel wird angetrieben durch einen Synchronmotor, der über ein Getriebe mit verschiedenen Untersetzungen und eine elektromagnetische Kupplung an die Spindel angeschlossen ist (siehe Schaltbild MK 1). Nach dem Abtasten der Walze erfolgt eine Abschaltung von Antriebsmotor und Kupplung über Mikroschalter (siehe Schaltbild VR 1). Direkt an die Spindel angekoppelt ist ein hochlineares 40-Wendel-Potentiometer der Fa. Beckman. Die Linearität wird mit $2,5 \cdot 10^{-4}$ angegeben. Die Endanschlüsse des Potentiometers liegen auf -5,6 V und + 5,6 V . Über den Mittelabgriff wird der zu verstärkende Teil der Spannung einem stromkonstanten Verstärker (siehe Schaltbild Y 1) zugeführt. Dieser wandelt die linear ansteigende Spannung in einen auf die Y-Ablenkspulen angepaßten linear ansteigenden Strom um.

4. Der Elektronenstrahlmikroschreiber

4.1 Der Aufbau des Elektronenstrahl-Mikroschreibers

Abb. 6 zeigt den elektronenoptischen Aufbau des Mikroschreibers (14). Das Strahlerzeugungssystem wird mit einer Spitzenkatode (19) betrieben. Damit läßt sich im Vollstrahlbetrieb (14) bei einer Lebensdauer der Katode von mehr als 50 Stunden ein Richtstrahlwert von ca. $2 \cdot 10^5 A/cm^2 sr$ erzielen (19). Zur Vermeidung von thermischer Drift ist das Strahlerzeugungssystem mit einem Quarzzylinder stabilisiert (18). Die Beschleunigungsspannung beträgt 50 kV.
Durch eine zweistufige elektronenoptische Verkleinerung wird eine Elektronensonde von ca. 100 nm erzeugt. Als erste Verkleinerungslinse dient ein umgebauter Kondensor 1 des SIEMENS-Elmiskops I. Als zweite Verkleinerungslinse wurde eine Kondensor-Objektiv-Einfeldlinse (KOE) mit einer Spaltweite S = 50 mm und einem Bohrungsdurchmesser von D = 25mm eingesetzt. Die Linse arbeitet bei einer Brennweite von f = 15 mm. Die Registrierebene befindet sich etwa in der Spaltmitte der Polschuhe. Eine 300 µm Dünnfilm-Aperturblende befindet sich in der Hauptebene des Kondensorfeldes der Linse. Bei durchstrahlbaren Registrierfolien ermöglicht das Objektivfeld der KOE-Linse zusammen mit einem Projektiv die Einstellung der optimalen Sonde.

Die Konstanz der Hochspannungsversorgung war besser als $8 \cdot 10^{-5}$/min, die Stromkonstanz der ersten Verkleinerungslinse $5 \cdot 10^{-5}$/min und der zweiten Verkleinerungslinse $1 \cdot 10^{-5}$/min.

Das Ablenkplattenpaar zur Hell-Dunkel-Steuerung des Mikroschreibers befindet sich vor der ersten Verkleinerungslinse (Abb. 4) (8). Es besteht aus zwei 10 cm langen Kupferplatten, die sich im Abstand von 2,5 mm gegenüberstehen. Die Austastblende mit 350 µm Durchmesser ist ca. 20 cm unter den Platten angebracht, so daß eine Ablenkspannung von

Abb. 6: Aufbau des Mikroschreibers

15 V ausreicht, um den mit 50 kV beschleunigten Elektronenstrahl dunkel zu tasten.

Die X- und Y-Ablenkung des Elektronenstrahles erfolgt über ein magnetisches Doppelablenksystem der Fa. Carl ZEISS, Oberkochen. Jedes Ablenksystem besteht aus vier um 90^{o} versetzten Spulen mit einem Kern aus Hyperm 800, die auf einem Kreisring angeordnet sind. Die Ablenkung erfolgt im magnetischen Nebenfeld der Spulen, was größere Bereiche linearer Ablenkung ermöglicht (20). Die bei Raster-Elektronenmikroskopen übliche Doppelablenkung besitzt den Vorteil, daß der Hauptstrahl des Elektronenstrahlbündels auch bei großen Ablenkwinkeln die vordere Hauptebene der nachfolgenden Linse in der optischen Achse schneidet. Für ein Bildfeld von 1 mm^2 ist ein Ablenkwinkel von ca. $\pm 2^{o}$ erforderlich.

Der Stigmator zur Korrektur des zweizähligen axialen Astigmatismus wurde oberhalb des Doppelablenksystems angebracht. Er bestand aus zwei im Azimut um 45^{o} gegeneinander verdrehten magnetischen Vierpollinsen mit unabhängig voneinander einstellbarer Brechkraft. Experimentell ergab sich, daß die Korrektur des zweizähligen axialen Astigmatismus ausreicht, um einen Sondendurchmesser von 50 bis 100 nm zu erzielen.

4.2 Der Aufbau der Kondensor-Objektiv-Einfeldlinse

Die in Abb. 7 gezeigte KOE-Linse zeichnet sich dadurch aus, daß die Bauteile der Linse, wie z.B. Erregerspulen (1), Polschuhe (2), Ablenkelemente (3) und Stigmator (4) außerhalb des Vakuums liegen. Nur der Objekttisch (5), die Blendenverschiebung (6) und der Halbleiterdetektor (7) ragen in den Vakuumraum herein. Dieser wird durch die beiden nichtmagnetischen Abschlußplatten (8) der Polschuhe und die beiden Röhrchen (9) gebildet.

Die Linse hat einen Bohrungsdurchmesser von D = 25 mm, eine Spaltweite von S = 50 mm und N = 8000 Windungen. Im Augenblick wird die

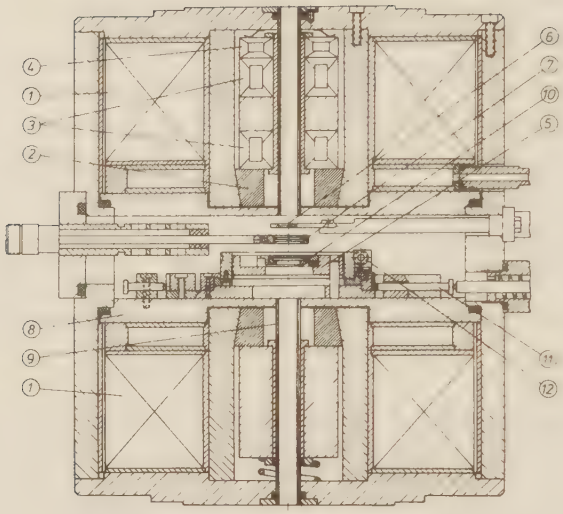


Abb. 7: Schnitt durch die Kondensor-Objektiv-Einfeldlinse

Linse für U = 50 kV-Elektronen mit dem Linsenstrom I = 0,68 A betrieben. Damit erreicht man für die im nächsten Kap. 4.3 definierte Größe k^2 den Wert: $k^2 = 1,18$. Der teleskopische Elektronenstrahlverlauf liegt für diese Linse bei $k^2 = 0,86$.

Die Objekthalterung (10) befindet sich auf dem Objekttisch (5), der in allen drei Koordinatenrichtungen verschiebbar ist. In X- und Y-Richtung (11) ist eine Verschiebung mit Hilfe von Getriebemotoren um $\pm$ 5 mm möglich. In Z-Richtung (12) wird das Objekt nach einmal erfolgter Einstellung der richtigen Objektlage nur sehr geringfügig verschoben, so daß eine manuelle Verschiebemöglichkeit ausreicht.

4.3 Elektronenoptische Betrachtungen zur KOE-Linse

Durch die Verwendung einer Spitzenkatode und einer zweistufigen elektronenoptischen Verkleinerung konnte der geforderte Elektronenstrahldurchmesser von d = 100 nm erzeugt werden.

Betrachtet man den auf die Registrierebene bezogenen Radius des sphärischen Fehlerscheibchens, das von beiden Linsen erzeugt wird, so gilt:

$$\delta_{sges} = M_2 \cdot \delta_{s1} + \delta_s = (M_2^4 \cdot C_{s1} + C_s)\alpha^3$$

Dabei ist M_2 der Abbildungsmaßstab der zweiten Linse, α die Apertur der Elektronensonde, C_{s1} und C_s die asymptotischen sphärischen Bildfehlerkoeffizienten der ersten und zweiten Verkleinerungslinse. C_{s1} ist von gleicher Größenordnung wie C_s , daher ist $M_2^4 \cdot C_{s1} \ll C_s$. Daraus folgt, daß im wesentlichen die Abbildungsfehler der zweiten Verkleinerungsstufe - das ist das Kondensorfeld der KOE-Linse - die Größe der Sonde bestimmen. Die Bildfehler der ersten Linse brauchen deshalb weiterhin nicht mehr berücksichtigt werden.

Die Ermittlung einiger paraxialer Kenngrößen der Linse wie Brennweite f , Farbfehlerkoeffizient C_F , Öffnungsfehlerkoeffizient C_s usw. erfolgte numerisch [+]. Die Ergebnisse sind zum Teil in Abb. 8 wiedergegeben, in der einige paraxiale Elektronenbahnen sowie der Verlauf der axialen Feldverteilung, der den Rechnungen zu Grunde gelegt wurde, dargestellt sind.

Bei den Rechnungen wurde davon ausgegangen, daß eine Quelle, die sich im Abstand von 25 cm vor der Z = O-Ebene, also der Spaltmitte zwischen

---

[+] Herrn Dipl. Phys. D. Kern danke ich herzlich für die Berechnung der paraxialen Elektronenbahnen, der Bildfehlerkoeffizienten C_F und C_s sowie der Brennweite f für die teleskopische Elektronenbahn, d. h. sämtlicher in Abb. 6, 7 und 8 wiedergegebenen Daten.

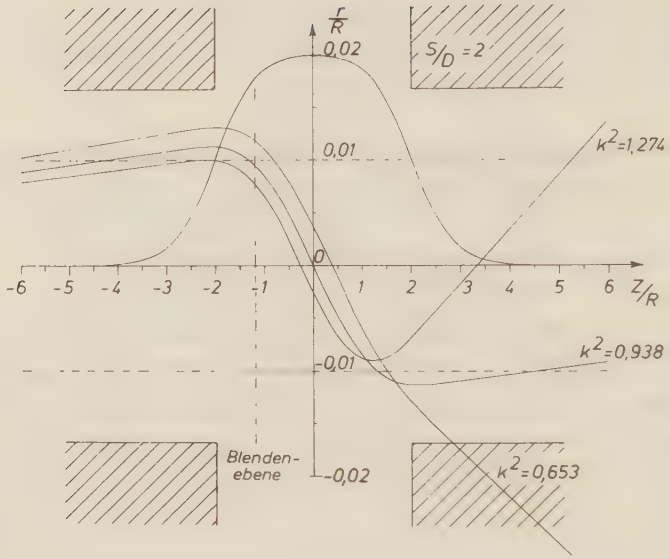


Abb. 8: Axialer Feldverlauf mit paraxialen Elektronenbahnen

den Polschuhen befindet, abgebildet werden soll. Beim sogenannten telezentrischen Strahlverlauf befindet sich ein zweites Bild der Quelle in einem Abstand von 25 cm hinter der Z = O-Ebene.

Dieser telezentrische Strahlverlauf wird für einen Linsenstrom von 0,605 A erreicht, was einem $k^2 = 0,938$ entspricht. Dabei wurde folgende Definition von k^2 zu Grunde gelegt:

$$k^2 = \frac{e \cdot B_o^2 \cdot R^2}{8 m_o \cdot U^*}$$

wobei B_o die magnetische Induktion in der Spaltmitte auf der Achse, m_o die Ruhemasse, e die Ladung des Elektrons und U^* die relativistisch

korrigierte Beschleunigungsspannung $U^* = U\left(1 + \frac{eU}{2m_o c^2}\right)$ bedeutet; c ist die Lichtgeschwindigkeit.

Zur Berechnung des Stromes in der Elektronensonde wird eine quadratische Überlagerung der Fehlerscheibchen angenommen (15, 16). Diese Annahme erscheint sinnvoll, da Hoch, Kern und Yamazaki (17) nachgewiesen haben, daß für die hier vorliegenden Verhältnisse die Abweichungen zwischen diesem Modell und der exakten wellenoptischen Lösung nur sehr gering sind. Sie sind mit Sicherheit geringer als die bei der Messung des Sondenstromes auftretenden Meßfehler.

Der Farbfehlerkoeffizient C_F kann aus der Abb. 9 entnommen werden. Bei der in Kap. 4.1 angeführten Stabilität der Anlage und bei den verwendeten Aperturen ergab sich, daß der chromatische Fehler der Linse vernachlässigt werden kann.

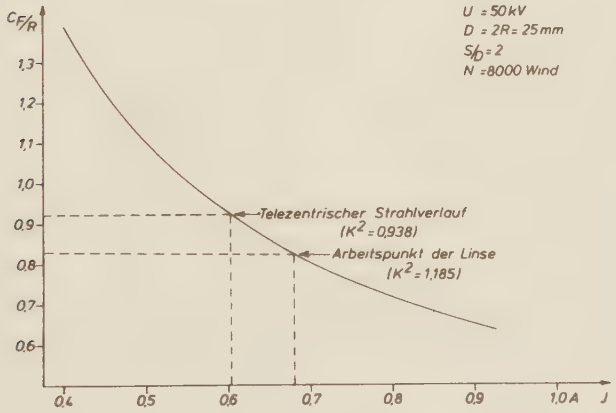


Abb. 9: Abhängigkeit des Farbfehlerkoeffizienten vom Linsenstrom

Der zweizählige axiale Astigmatismus kann mit Hilfe eines Stigmators soweit korrigiert werden, daß das Auftreten einer astigmatischen Brennstrichdifferenz nicht mehr gemessen werden konnte.

Die Beugung der Elektronenwelle ist für eine Sondengröße von d = 50 bis 100 nm ebenfalls vernachlässigbar klein gegen den allein noch zu berücksichtigenden sphärischen Fehler der KOE-Linse.

Man erhält dann für den Sondenstrom:

$$I = \beta \cdot \pi^2/4 \quad (d^2 - C_s^2 \cdot \alpha^6/4)\alpha^2$$

Dabei bedeuten: β der Achsenrichtstrahlwert der verwendeten Elektronenquelle; d der Elektronensondendurchmesser; α die Sondenapertur und C_s den Öffnungsfehlerkoeffizienten der zweiten Verkleinerungsstufe. Der Wert für C_s von 9, 25 mm wurde der Abb. 10 entnommen, welche die Abhängigkeit des Öffnungsfehlerkoeffizienten vom Linsenstrom darstellt.

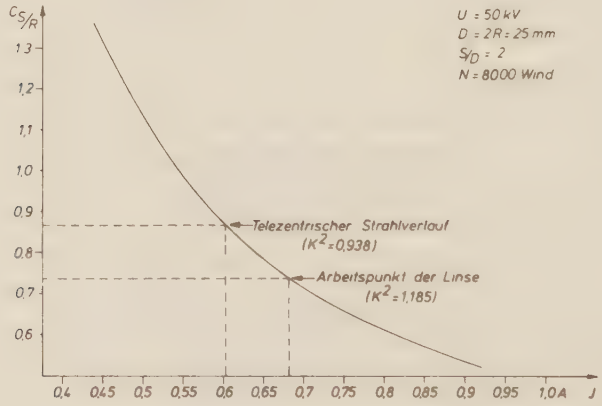


Abb. 10: Abhängigkeit des Öffnungsfehlerkoeffizienten vom Linsenstrom

Die Abhängigkeit des Sondenstromes I von der Sondenapertur α für die hier verwendete KOE-Linse ist in Abb. 11 für die beiden Sondendurchmesser d = 50 nm und d = 100 nm dargestellt. Für den Richtstrahlwert β wurde nach Holl (19) der für eine Spitzenkatode bei einem Heizstrom von 3,5 A zu erwartende Wert von $\beta = 2 \cdot 10^5$ A/cm^2 · sr verwendet. Aus der Abb. 9 ergibt sich, daß der bei einer 50 nm-Sonde maximale Sondenstrom $I = 2,6 \cdot 10^{-9}$ A für eine Apertur von $\alpha_{opt} = 1,7 \cdot 10^{-2}$ beträgt. Für eine 100 nm-Sonde beträgt der maximale Strom $I = 1,6 \cdot 10^{-8}$ A bei einer Apertur von $\alpha_{opt} = 2,1 \cdot 10^{-2}$.

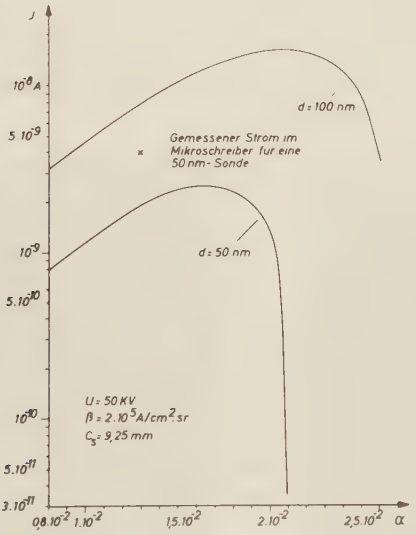


Abb. 11: Abhängigkeit des Sondenstromes von der Apertur

Aus dem steilen Abfall der beiden Kurven für größere Aperturen sieht man, daß es für die experimentelle Sicherheit erforderlich ist, bei

Aperturen zu arbeiten, die etwas kleiner sind, als die optimale Apertur α_{opt}. Keinesfalls darf man aber bei zu großen Aperturen arbeiten. In der hier beschriebenen Anordnung wurde daher eine Blende mit einem Radius von 150 µm verwendet. Dies entspricht einer Apertur von $1,3 \cdot 10^{-2}$. Die Abweichung des gemessenen Stromes für eine 50 nm-Sonde von der Kurve ist im wesentlichen auf die experimentelle Schwierigkeit der Einstellung des exakten Richtstrahlwertes zurückzuführen.

Die Ermittlung des Durchmessers der Aperturblende erfolgte mit Hilfe der Abb. 8. Da sich die Aperturblende im Feld befindet, ergibt sich der optimale Blendenradius r_{opt} nicht einfach als Produkt aus Brennweite f und optimaler Apertur α_{opt}, sondern als Achsenabstand der paraxialen Bahn in der Blendenebene, die in der Registrierebene die Steigung $-\alpha_{opt}$ hat. Es ergeben sich folgende Blendenradien: für die 100 nm-Sonde: $r_{opt} = 210$ µm und für die 50 nm-Sonde: $r_{opt} = 175$ µm.

Würde sich die Registrierebene genau in der Spaltmitte der Polschuhe, also in der Z = O-Ebene befinden (Abb. 8), dann müßte in der hier beschriebenen Arbeit der für die telezentrische Elektronenbahn erforderliche Wert von $k^2 = 0,938$ verwendet werden. Die Registrierebene befand sich jedoch oberhalb der Z = O-Ebene, d.h. im Kondensorfeld der KOE-Linse. Dadurch war es möglich, durch das Objektivfeld der KOE-Linse eine zur elektronenoptischen Kontrolle brauchbare Abbildung der Registrierebene auf den Endbildleuchtschirm vorzunehmen. Außerdem sind die Linsenfehler bei dem für diesen Betrieb notwendigen höheren Linsenstrom von 0,68 A, was einem $k^2 = 1,18$ entspricht, nach Abb. 9 und 10 geringer.

5. Experimentelle Ergebnisse

5.1 Experimentelle Bestimmung der maximalen Bildpunktzahl des Elektronenstrahl-Mikroschreibers

Zur Zeit wird der Mikroschreiber noch ohne dynamische Korrektur betrieben. Infolgedessen wird bereits bei Ablenkwinkeln kleiner als $\pm 1^{o}$ auf Grund der Abbildungsfehler sowohl der Ablenksysteme, als auch der nachfolgenden KOE-Linse die Elektronenstrahl-Sonde verbreitert. Die Abbildungen 14 a und b zeigen Ausschnitte aus dem Eigenraster, das in Kollodium (21) eingegraben und mit Gold-Palladium schrägbeschattet ist (22). Die Abb. 14 a zeigt ein Gebiet mit sehr geringen Ablenkwinkeln. Die Gitterkonstante beträgt 100 nm bei einer Linienbreite von 50 nm. Die Abb. 14 b zeigt ein Gebiet mit Ablenkwinkeln um 1^{o}, was einer Auslenkung in der Registrierebene von 200 µm entspricht. Der Kontrast ist durch die Verbreiterung der Sonde kleiner geworden. Der Grund, wes-

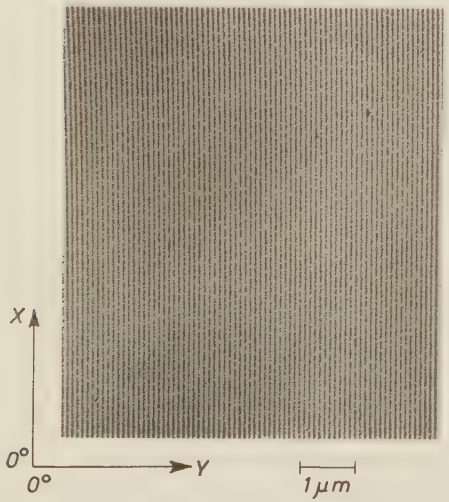


Abb. 14 a: Eigenraster bei kleinen Ablenkwinkeln

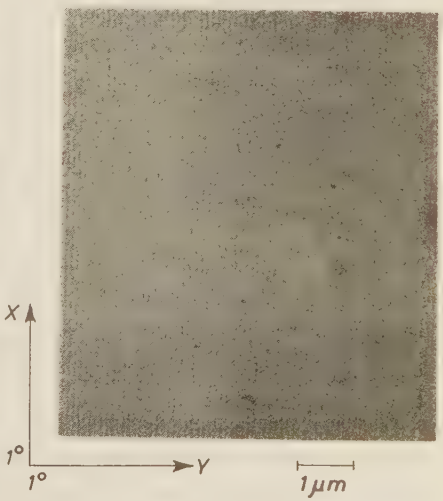


Abb. 14 b: Eigenraster bei Ablenkwinkeln von 1^{o}

halb die Zeilen noch aufgelöst werden können, obwohl der Sondendurchmesser sich mindestens um den Faktor 5 vergrößert hat, liegt in einer unsymmetrischen Intensitätsverteilung in der Sonde bei diesen Ablenkwinkeln.

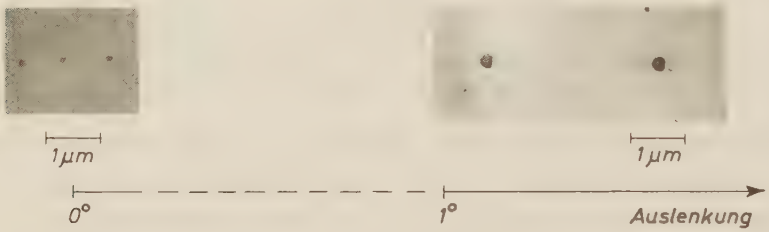


Abb. 15 a: Elektronenstrahlsonde bei kleinen Auslenkwinkeln

Abb. 15 b: Elektronenstrahlsonde bei Auslenkwinkeln von 1°

Die Abbildungen 15 a und b zeigen die Sondenvergrößerung bei zunehmenden Ablenkwinkeln. Als Registrierverfahren wurde das Aufwachsen von Polymerisat auf eine Kohlenstoff-Folie benutzt (5). In Abb. 15 a sind die Ablenkwinkel sehr klein und die gedruckte Sonde im wesentlichen kreisförmig. In Abb. 15 b ist der Elektronenstrahl um denselben Winkel wie in Abb. 14 b ausgelenkt. Man sieht die starke Sondenverbreiterung sowie die unsymmetrische Intensitätsverteilung in der Sonde.

Das Bildfeld, das mit der derzeitigen Anordnung des Elektronenstrahl-Mikroschreibers beschrieben werden kann, beträgt maximal $400 \times 400\ \mu m^2$, d.h. der Mikroschreiber kann zur Zeit bei einem Sondendurchmesser von 50 nm maximal 8000 Bildpunkte pro Zeile und ebenso viele Zeilen speichern. Wie man aus Abb. 14 b erkennt, sinkt der Kontrast am Rand des Bildfeldes infolge der Sondenverbreiterung ab. Für gleichmäßigen Kontrast reduziert sich das Bildfeld auf $300 \times 300\ \mu m^2$. Entsprechend beträgt die Bildpunktzahl $6000 \cdot 6000 = 3,6 \cdot 10^7$ Bildpunkte.

5.2 Experimentelle Bestimmung der maximalen Bildpunktzahl des Steuersystems

Bei der Frage nach der Bildpunktzahl, die das Steuersystem auflösen kann, muß man zwischen den beiden Ablenkrichtungen unterscheiden. Die Auflösung bei der Abtastung entlang der Walze, die der Y-Ablenkrichtung im Mikroschreiber entspricht, zeigt die Abb. 14a. Die Ausschnitte des Eigenrasters in Abb. 14a und b sind einer Aufnahme entnommen, deren Y-Amplitude einer Bildlänge von 1 mm entspricht.

Bei einer Gitterkonstante des Eigenrasters von 100 nm bedeutet dies, daß von der Steuerung in Y-Richtung 10 000 Zeilen aufgelöst werden

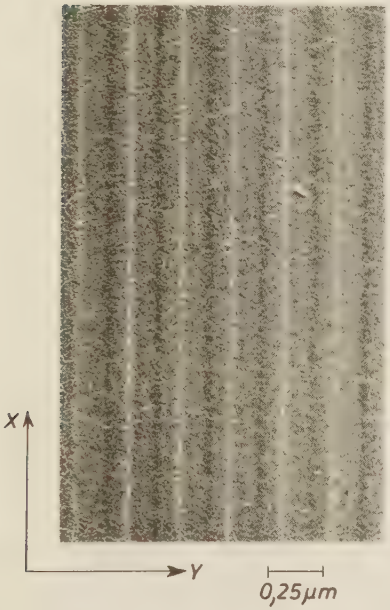


Abb. 16 a: Strichmuster in Zeilenrichtung

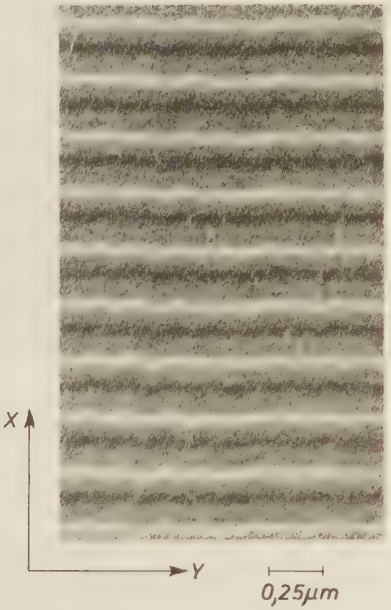


Abb. 16 b: Strichmuster quer zur Zeilenrichtung

und zwar über die gesamte Bildlänge, da das 40-Wendel-Potentiometer über seinen gesamten Widerstandsbereich dieselbe Linearität besitzt.

Daß die Auflösung in y-Ablenkrichtung sehr gut ist, zeigt auch die Abb. 16a, auf der Striche von der Originalvorlage in Zeilenrichtung (Abb. 20) mit sehr guter Kantenschärfe auf Kollodium aufgezeichnet wurden. Die Strichbreite beträgt 125 nm.

Die Auflösung in Zeilenrichtung, die der X-Ablenkrichtung entspricht, wird begrenzt sowohl durch die mechanischen Schwingungen, die der Bildabtastkopf und der Abtastkopf für den Austast- und Triggerimpuls relativ zueinander ausführen, als auch durch die elektronische Instabilität des Triggereinsatzpunktes. Durch diese Fehler wird die Synchronisierung zwischen dem Einsatzpunkt des X-Sägezahns und dem Bildsignal gestört. Die Abb. 16 b zeigt in Kollodium aufgezeichnete und mit Gold-Palladium schräg bedampfte Striche, die quer zur Zeilenrichtung verlaufen. Die Strichbreite beträgt 125 nm. Die Kanten sind nicht mehr so geradlinig wie bei den Strichen in Abb. 16 a. Die auftretenden Schwankungen betragen ca. 20 bis 30 nm, also etwa eine halbe Sondenbreite. Die Auflösung in Zeilenrichtung wird dadurch auf etwa 5000 Bildpunkte pro Zeile in X-Richtung reduziert. Die Bildpunktzahl, die das Steuersystem zur Zeit maximal auflösen und übertragen kann, beträgt daher $5 \cdot 10^7$ Bildpunkte.

Ein Vergleich der Bildpunktzahlen von Mikroschreiber und Steuersystem ergibt:

	Mikroschreiber	Steuersystem
X-Richtung	6000 Bildpunkte	5000 Bildpunkte
Y-Richtung	6000 Bildpunkte	10000 Bildpunkte

Aus dieser Gegenüberstellung ersieht man, daß in X-Richtung das Steuersystem die Bildpunktzahl begrenzt; in Y-Richtung begrenzt dagegen der Mikroschreiber die Bildpunktzahl.

5.3 Anwendungsbeispiele

Bei den Anwendungen für den Elektronenstrahlmikroschreiber steht die Maskenherstellung für integrierte Schaltkreise an erster Stelle. Abb. 17 zeigt die Originalvorlage, die solche Masken enthält. Die Originalgröße beträgt ca. 30 x 30 cm^2. Die zugehörige elektronenmikroskopische Aufnahme der Mikroaufzeichnung wird in Abb. 18 dargestellt. Die Aufzeichnung erfolgte in Polymethylmethacrylat. Die Bestrahlungsdosis, die zur Durchbelichtung einer PMM-Schicht von ca. 100 nm Dicke erforderlich ist, beträgt nach Kurz (23) ca. $5 \cdot 10^{-4}$ Cb/cm^2

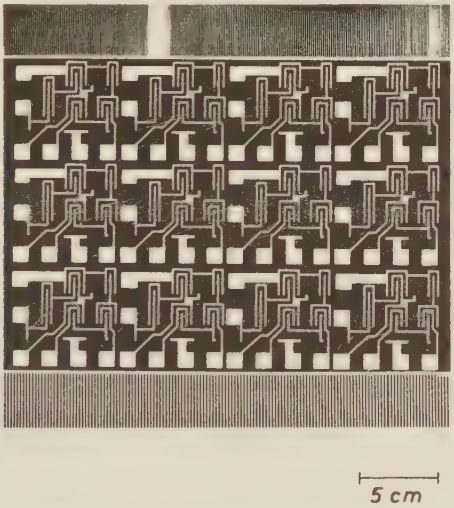


Abb. 17: Originalvorlage einer Leiterbahnenmaske für integrierte Schaltkreise

Bei einem Sondenstrom von $4 \cdot 10^{-9}$ A und einer 50 nm-Sonde beträgt die Stromdichte 160 A/cm^2. Die Zeit, die erforderlich ist, um mit der angegebenen Dosis einen Bildpunkt durchzubelichten, wäre also

$$\frac{5 \cdot 10^{-4}\ Cb/cm^2}{160\ A/cm^2} = 3{,}2 \cdot 10^{-6}\ s\ .$$

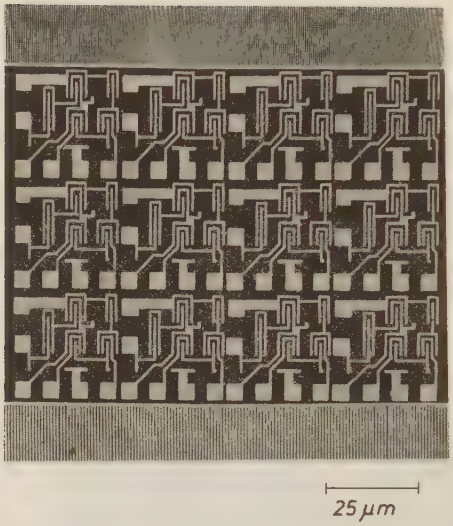


Abb. 18: Mikroaufzeichnung der Leiterbahnenmaske

Will man 10^8 Bildpunkte durchbelichten, so beträgt die erforderliche Zeit 320 s, also ca. 5 Minuten. Für diese Größenordnung der Registrierzeit ist die Abtastzeit des Steuersystems ausgelegt. Sie kann mit dem vorhandenen Wechselgetriebe zwischen 3 und 10 Minuten variiert werden. Die Bestrahlungsdosis, die erforderlich ist, um auf einer Kohlenstoffolie durch Kontamination einen brauchbaren Kontrast zu erzielen, ist um einen Faktor 1000 höher (5). Das heißt aber, daß Mikroaufzeichnungen in einer Größenordnung von einigen hundert µm durch Kontamination auf Kohlenstoff nicht mehr möglich sind.

Die Abb. 19 zeigt eine elektronenoptische Ausschnittsvergrößerung aus Abb. 18. Die zur Aufzeichnung verwendete ca. 100 nm dicke PMM-Schicht wurde freitragend präpariert und mit einer 20 nm dicken Kohlenstoff-Schicht verstärkt. Nach der Entwicklung in Äthanol wurde die Folie rotierend mit Gold-Palladium bedampft. Die Strichbreite beträgt 0,45 µm mit einer für PMM guten Kantenschärfe.

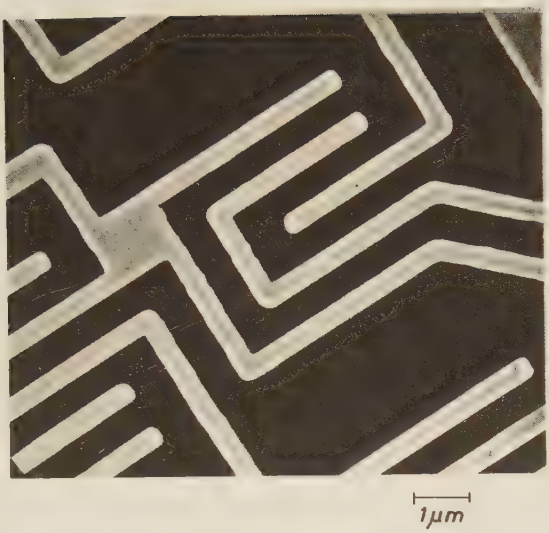


Abb. 19: Ausschnitt aus Abb. 18

Ein weiteres Anwendungsgebiet für die Elektronenstrahlmikroschreiber stellt die Herstellung von Testobjekten für Lichtmikroskopie dar (14). Abb. 20 zeigt das Original eines solchen Testmusters, das aus senkrecht zueinander stehenden Strichgittern besteht.

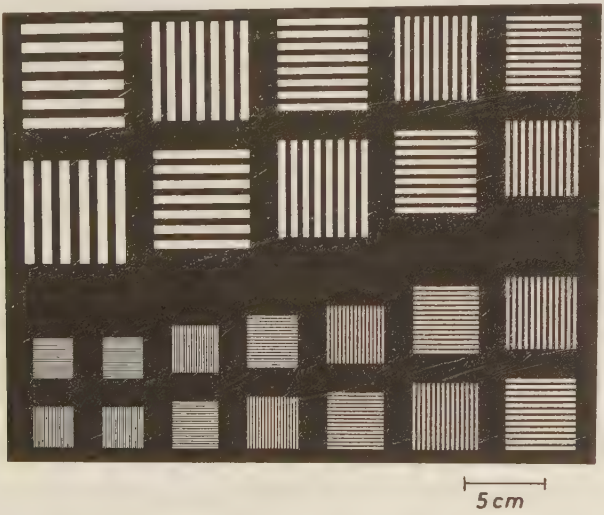


Abb. 20: Original des lichtoptischen Testmusters

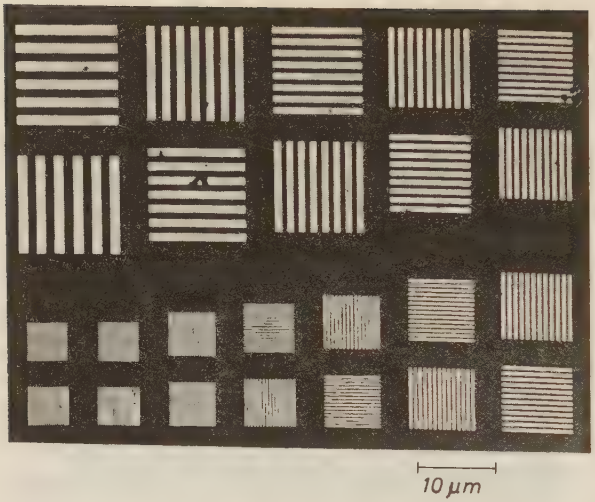


Abb. 21: Mikroaufzeichnung des lichtoptischen Testmusters

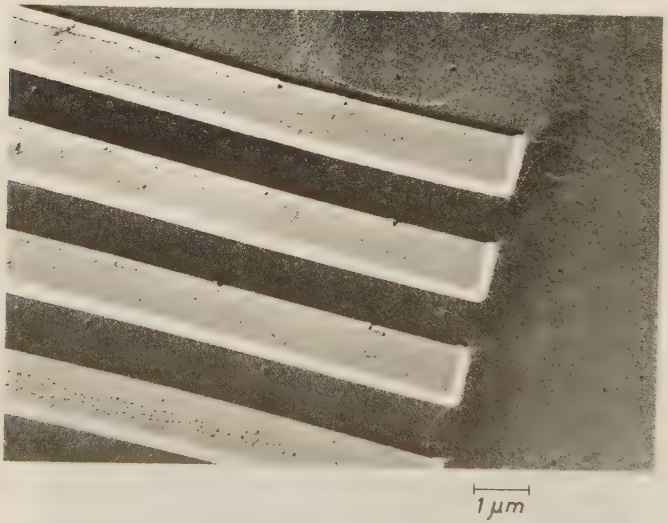


Abb. 22: Elektronenoptische Ausschnittvergrößerung aus Abb. 21

Die Größe der Originalvorlage beträgt ca. 25 x 20 cm^2. Die Mikroaufzeichnung des lichtoptischen Testmusters erfolgte ebenfalls auf einer PMM-Folie mit 140 nm Dicke (Abb. 21). Die breitesten Striche sind 1,25 µm breit. Die feinsten Striche besitzen eine Breite von 125 nm.

Die feinsten Striche in Zeilenrichtung sind zum Teil fehlerhaft aufgezeichnet. Dies liegt aber nicht an einer Auflösungsbegrenzung durch den Mikroschreiber, denn quer zur Zeilenrichtung ist die Auflösung sehr gut. Der Grund dafür sind Schwierigkeiten, die bei der Präparation des PMM-Lackes auftreten.

Eine elektronenoptische Ausschnittsvergrößerung aus dem Testmuster zeigt die Abb. 22. Die Strichbreite beträgt dort 1,25 µm. Die Mikroaufzeichnung wurde nach dem Entwickeln mit Gold-Palladium schrägbeschattet. Die Striche besitzen eine ausgezeichnete Kantenschärfe.

Die Möglichkeit, mit der hier beschriebenen Analogsteuerung beliebig komplizierte Muster aufzuzeichnen, zeigt die nächste Aufnahme. In Abb. 23 ist eine Schwarz-Weiß-Zeichnung dargestellt, die im Original,

Abb. 23: Originalvorlage

Abb. 24: Mikroaufzeichnung

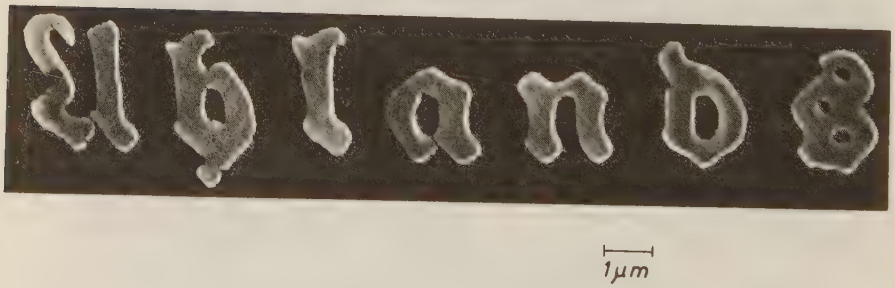


Abb. 25: Elektronenoptische Ausschnittvergrößerung aus Abb. 24

Abb. 23: Originalvorlage

5 cm

Abb. 26: Mikroaufzeichnung

25 µm

welches zur Mikroaufzeichnung verwendet wurde, in einer Größe von 45 x 30 cm^2 vorlag. Die Mikroaufzeichnung (Abb. 24) ist ca. 250 µm groß und erfolgte in PMM. Sie wurde nach dem Entwickeln rotierend mit Gold-Palladium bedampft.

Gegenüber der Originalvorlage liegt die Mikroaufzeichnung als Negativ vor. Dies entspricht den Verhältnissen auf der PMM-Folie, bei der die belichteten Stellen entwickelt wurden und daher die elektronenmikroskopische Aufnahme an diesen Stellen heller ist als an den unbelichteten Stellen.

Die Abb. 25 zeigt eine elektronenmikroskopische Ausschnittvergrößerung, auf der noch Details von ca. 100 nm Größe aufgelöst werden.

Um eine bessere Vergleichsmöglichkeit zwischen Originalvorlage und Mikroaufzeichnung zu haben, wurde die Abb. 24 der Mikroaufzeichnung umkopiert (siehe Abb. 26) und mit Abb. 23 verglichen. Dadurch wird deutlich, daß die Mikroaufzeichnung sehr gut mit der Originalvorlage übereinstimmt, denn selbst feinste Striche und einzelne Punkte in einer Größenordnung von 100 nm - 200 nm sind auf der Mikroaufzeichnung noch gut aufgelöst.

6. Zusammenfassung

Es wurde ein Elektronenstrahl-Mikroschreiber mit einer opto-elektronischen Analogsteuerung aufgebaut. Die zu verkleinernde Originalvorlage befindet sich auf einer hochreflektierenden Walze und wird rasterförmig abgetastet. Das dabei von einer Fotodiode erzeugte elektrische Signal wird in den Mikroschreiber übertragen und dort mit einer feinen Elektronensonde auf einer Registrierfolie wieder aufgezeichnet.

Im Mikroschreiber wird ein Strahlerzeugungssystem mit Spitzenkatode bei 50 kV Beschleunigungsspannung verwandt. Der cross-over des Elektronenbündels im Strahlerzeugungssystem wird zweistufig auf eine Sondengröße von 50 nm Durchmesser verkleinert. Als zweite Verkleinerungslinse wurde das Kondensorfeld einer Kondensor-Objektiv-Einfeldlinse mit einer Brennweite von 15 mm eingesetzt. Durch die kleinen Fehlerkoeffizienten dieser Linse wird die hohe Sondenstromdichte von 160 A/cm^2 erreicht. Die Elektronensonde wird mit Hilfe eines Doppelablenksystems rasterförmig über die Registrierfolie geführt. Die zur Ablenkung erforderlichen Sägezahnströme werden analog zum opto-mechanischen Abtastprozeß erzeugt. Das von der Fotodiode gelieferte Bildsignal wird so umgeformt und verstärkt, daß es zur Hell-Dunkel-Steuerung des Elektronenstrahles mittels zweier Ablenkplatten und einer Austastblende ausreicht.

Die Aufzeichnung des Mikrobildes erfolgt auf Polymethylmethacrylat, dessen belichtete Stellen sich entwickeln lassen.

Das analoge Steuersystem kann $5 \cdot 10^7$ Bildpunkte übertragen, während die maximale Bildpunktzahl, die der Elektronenstrahl-Mikroschreiber auflöst, $3,6 \cdot 10^7$ Bildpunkte beträgt. Damit war es möglich, Mikroaufzeichnungen einer Größe von 300 x 300 μm^2 mit einer Auflösung von 50 nm während einer Registrierzeit von ca. 5 Minuten herzustellen.

Herrn Prof. Dr. R. Speidel möchte ich sehr herzlich für die Anregung zu dieser Arbeit, für sein förderndes Interesse und für viele wertvolle Hinweise danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Möllenstedt danke ich für die ständige Förderung der Arbeit. Für wertvolle Diskussionen danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Schief.

Ich danke dem Zentrum für Datenverarbeitung der Universität Tübingen für die Überlassung von Rechenzeit.

7. Literatur

1 J. P. Beasley, 4th Int. Conf. on Electron and Ion Beam Sci. and Tech., Electrochemical Soc., 1970, 515 - 523

2 T. H. P. Chang, 4th Annual SEM-Symposium, Chicago, 1971, 417 - 424

3 F. S. Ozdemir, E. D. Wolf and Ch. R. Buckey, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED - 19, No. 35, May 1972, 624 - 628

4 Ch. Dix, J. P. Ballantyne and W. C. Nixon , IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED - 19, No. 5, May 1972, 641 - 646

5 K. H. Müller, Optik 33 (1971) 296, 331

6 T. H. P. Chang und W. C. Nixon , J. Sci. Instrum. 44 (1967) 231

7 G. Möllenstedt, R. Schief und R. Speidel, Optik 27 (1968) 488 - 491

8 R. Schief, Optik 29 (1969) 416 - 436

9 J. Greschner, R. Schief und F. Vorster, Optik 38 (1973) 147 - 155

10 R. Speidel, Proc. Fifth European Congress on Electron Microscopy, 1972, 162 - 167

11 E. Ruska, Deutsche Patentschrift Nr. 875 555 vom 29. 5. 1942

12 W. D. Riecke, Vth Int. Congress for Electron Microscopy, Philadelphia 1962, Vol. 1, KK - 5

13 I. Haller, M. Hatzakis and R. Srinivasan "High Resolution Positiv Resists for Electron Beam Exposure", IBM, J. Res. Dev. 12, 1968, 251 - 256

14 R. Speidel, Optik 23 (1965/66) 125

15 R. Speidel, J. P. Martin und B. Bauer, Optik 34 (1971) 321 - 333

16 T. Mulvey, Focusing of Charged Particles, Vol. 1 (1967) 469; Academic Press Inc., New York

17 H. Hoch, D. Kern und H. Yamazaki, Optik im Druck, 1974

18 A. Sakaki und G. Möllenstedt, Optik 13 (1956) 193

19 P. Holl, Optik 29 (1969) 122

20 F. Schleich, D. Hoffmeister, H. Koops und F. Lenz, Optik 27 (1968) 305

21 N. V. Rao, Z. angew. Phys. 19 (1965) 352

22 G. Möllenstedt und R. Speidel, Phys. Bl. 16 (1960) 192

23 D. Kurz, Diplomarbeit, Tübingen 1974

Stückliste zu Schaltbild B 1

Operationsverstärker

OP 1	CA 3030
OP 2	CA 3030

Dioden

D 1	1 N 914
D 2	1 N 914
D 3	1 N 914

Widerstände
(Ohm, Toleranz 5 %
Belastbarkeit 0, 5 Watt)

R 1	10 K
R 2	22 K
R 3	22 K
R 4	390
R 5	470 K
R 6	390
R 7	2, 2 K
R 8	1 K
R 9	1 K
R 10	390
R 11	22 K
R 12	390

Einstellbare Widerstände

P 1	100

Kondensatoren (Farad)

C 1	22 p
C 2	0, 1 µ
C 3	25 µ
C 4	22 p
C 5	0, 1 µ
C 6	25 µ
C 7	10 p
C 8	0, 1 µ
C 9	10 p
C 10	0, 1 µ

Stückliste zu Schaltbild B 2

Transistoren

T 1	2 N 2905
T 2	BC 107
T 3	BSY 54

Widerstände
(Ohm, Toleranz 5 %
Belastbarkeit 0, 5 Watt)

R 1	2, 2 K
R 2	1 K
R 3	1, 2 K
R 4	470
R 5	220

Einstellbare Widerstände

P 1	3 K

Stückliste zu Schaltbild X 1

Opto-elektronisches Steuerelement
BPX 28 der Fa. AEG - Telefunken

Widerstände
(Ohm, Toleranz 5 %
Belastbarkeit 0, 5 Watt)

R 1	1 K
R 2	8, 2 K

Einstellbare Widerstände

P 1	2 K

Stückliste zu Schaltbild B 4

Transistoren

T 1	BSY 54

Widerstände
(Ohm, Toleranz 5 %
Belastbarkeit 0,5 Watt)

R 1	1 K
R 2	1 K
R 3	1,2 K

Stückliste zu Schaltbild B 3

Transistoren

T 1	BSY 54
T 2	BSY 54

NAND - Gatter

N 1 ... N 4	FJH 131/7400

Dioden

Z 1	ZG 5,6

Widerstände
(Ohm, Toleranz 5 %
Belastbarkeit 0,5 Watt)

R 1	470
R 2	470
R 3	270
R 4	1 K
R 5	100

Stückliste zu Schaltbild AXT 1

Transistoren

T 1 ... T 9 alle vom
Typ BC 107

Dioden

D 1	1 N 914
D 2	1 N 914

Widerstände
(Ohm, Toleranz 5 %
Belastbarkeit 0,5 Watt)

R 1	2,2 K
R 2	10 K
R 3	1 K
R 4	10 K
R 5	10 K
R 6	10 K
R 7	10 K
R 8	1 K
R 9	2,2 K
R 10	33 K
R 11	1 K
R 12	4,7 K
R 13	1 K
R 14	1 K
R 15	10 K
R 16	1 K
R 17	5,6 K
R 18	33 K
R 19	1 K
R 20	4,7 K
R 21	1 K

Einstellbare Widerstände

P 1	10 K
P 2	10 K

Kondensatoren (Farad)

C 1	10 n
C 2	470 n
C 3	1,5 n

Stückliste zu Schaltbild X 3 = Y 1

Operationsverstärker

OP 1	µA 715 (Fa. Fairchild)
OP 2	MC 1438 R (Fa. Motorola)

Transistoren

T 1	2 N 4913
T 2	2 N 4904

Widerstände

(Ohm, Toleranz 5 %

Belastbarkeit 0, 5 Watt)

R 1	100 K
R 2	100 K
R 3	1 M
R 4	100 K
R 5	10 K
R 6	51
R 7	4, 7
R 8	4, 7
R 9	100
R 10	100
R 11	2, 2 K
R 12	2, 2 K
R 13	100

(Ohm, Toleranz 5 %

Belastbarkeit 5 Watt)

R 14	0, 5
R 15	0, 5

(Ohm, Manganin 0, 5 mm ϕ

bifilar gewickelt, Toleranz 1 %)

R 16	1

Einstellbare Widerstände

P 1	20 K
P 2	20 K

Kondensatoren (Farad)

C 1	25 µ
C 2	22 p
C 3	1 n
C 4	1 n
C 5	0, 47 µ

Stückliste zu Schaltbild VR 1

Transistoren

T 1	BC 107
T 2	BC 107
T 3	BC 107
T 4	BC 107
T 5	BSY 54

Dioden

D 1	1 N 914
D 2	1 N 914
D 3	1 N 914
D 4	1 N 4148

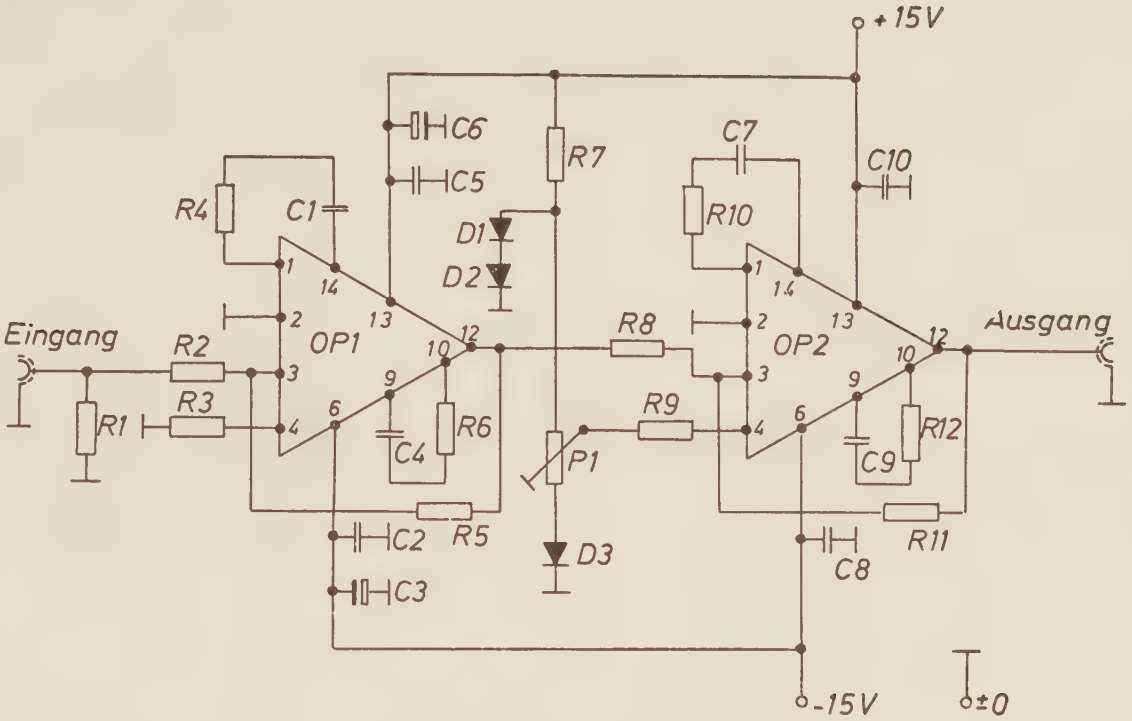
Widerstände
(Ohm, Toleranz 5 %
Belastbarkeit 0, 5 Watt)

R 1	10 K
R 2	10 K
R 3	1 K
R 4	10 K
R 5	33 K
R 6	1 K
R 7	1 K
R 8	1 K
R 9	2, 2 K
R 10	1, 2 K
R 11	1 K
R 12	2, 2 K
R 13	1, 2 K
R 14	1 K
R 15	10 K

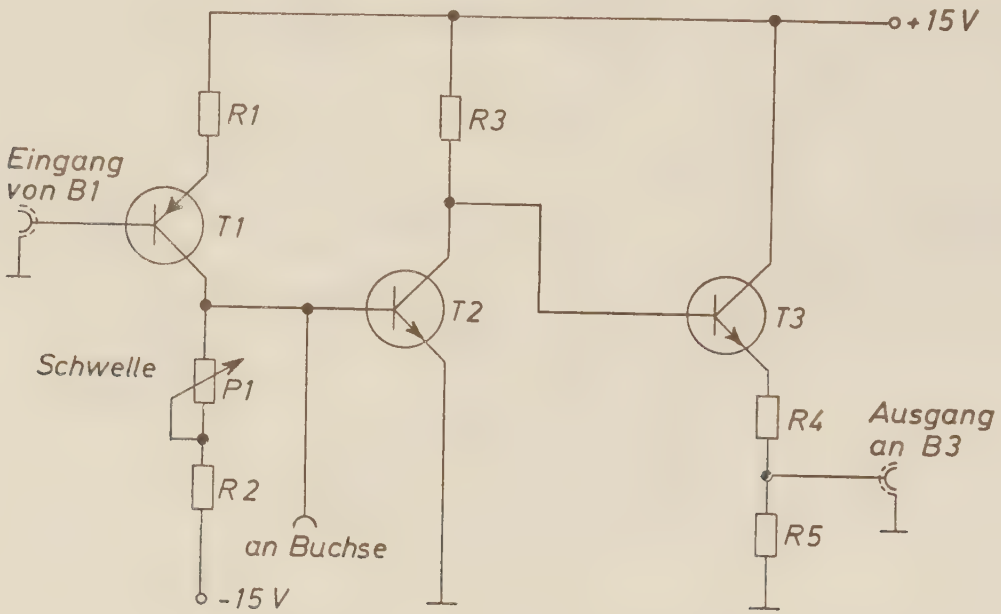
Kondensatoren (Farad)

C 1	0, 1 µ
C 2	0, 1 µ
C 3	0, 1 µ
C 4	0, 1 µ

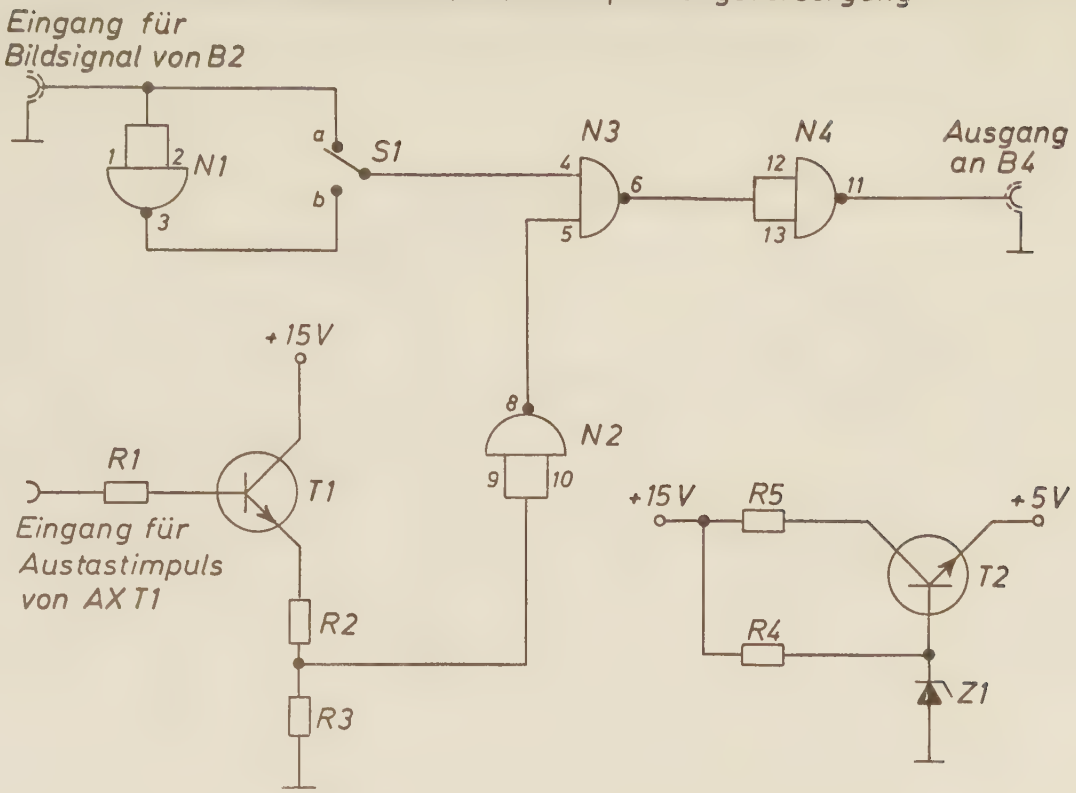
Signal - Verstärker (B1)



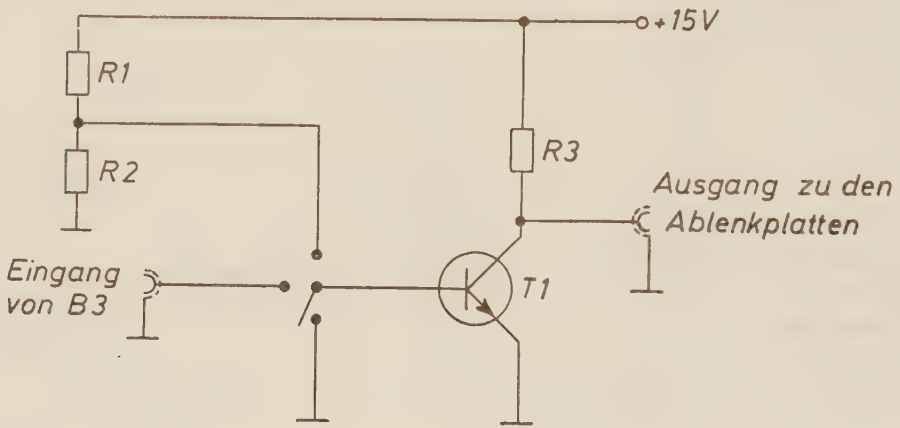
Jmpulsformerstufe (B2)



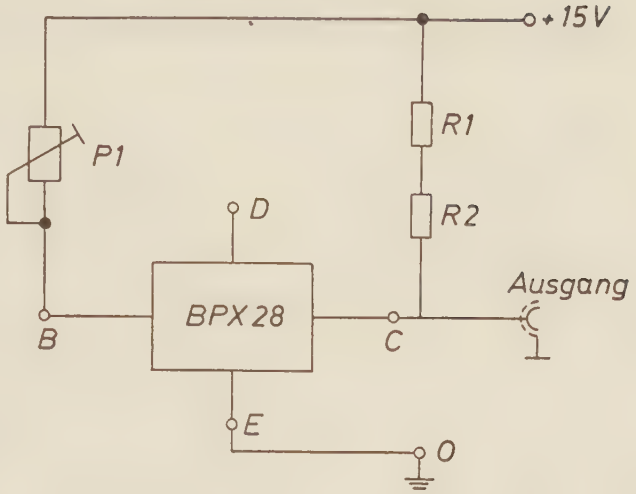
Umkehr- und Mischstufe (B3) mit Spannungsversorgung



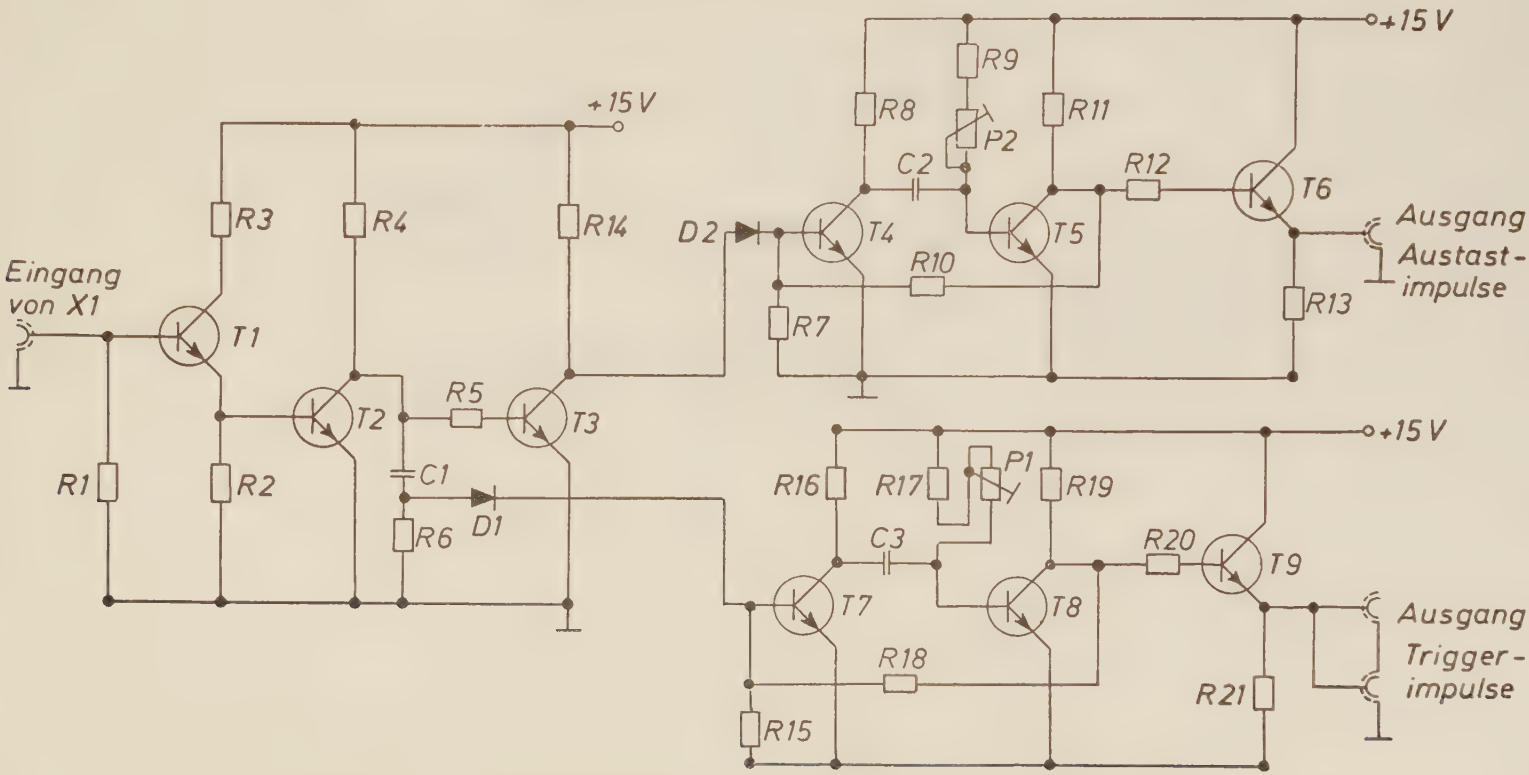
Endverstärker (B4)



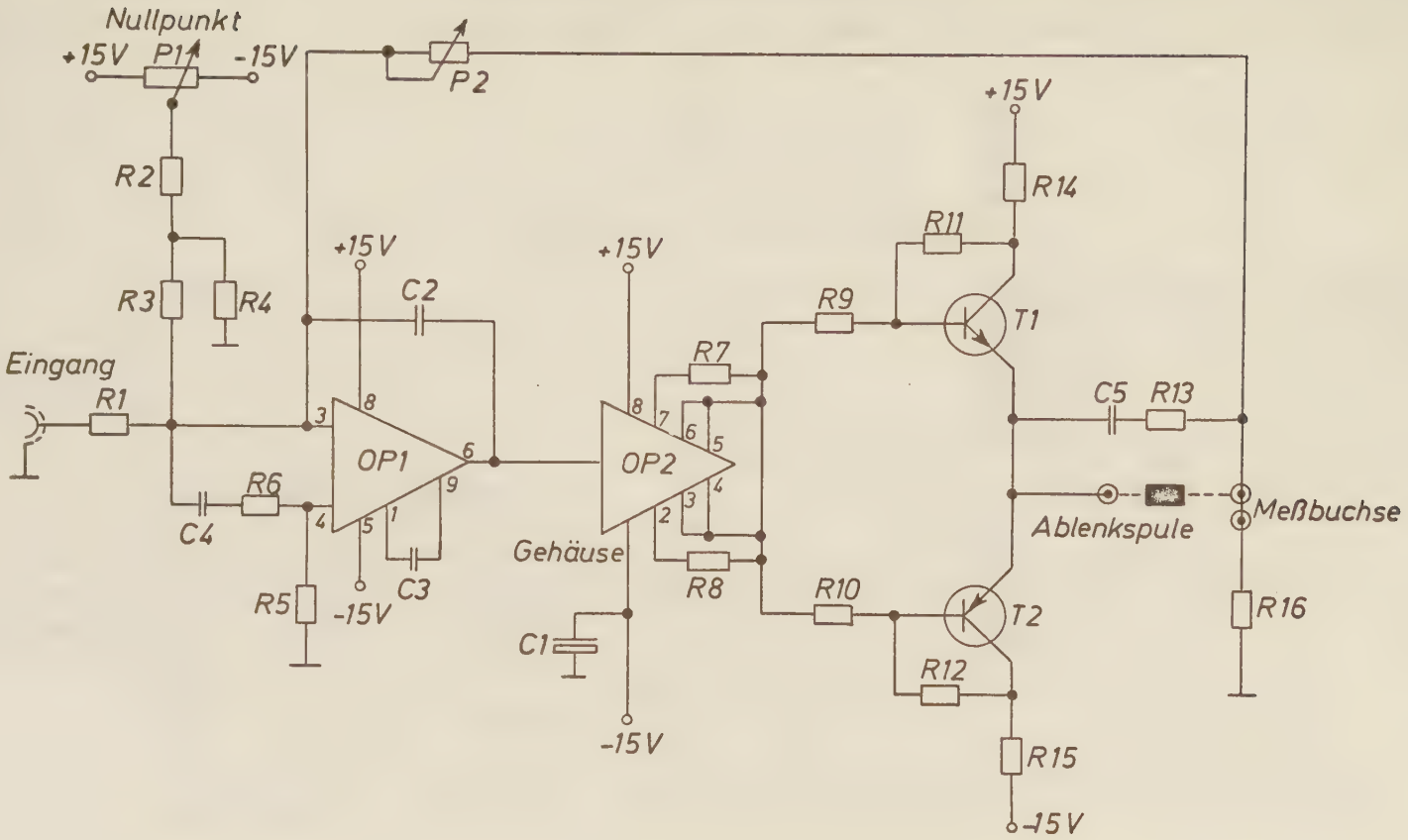
Optoelektronische Steuerung für
X-Synchronisation (X1)



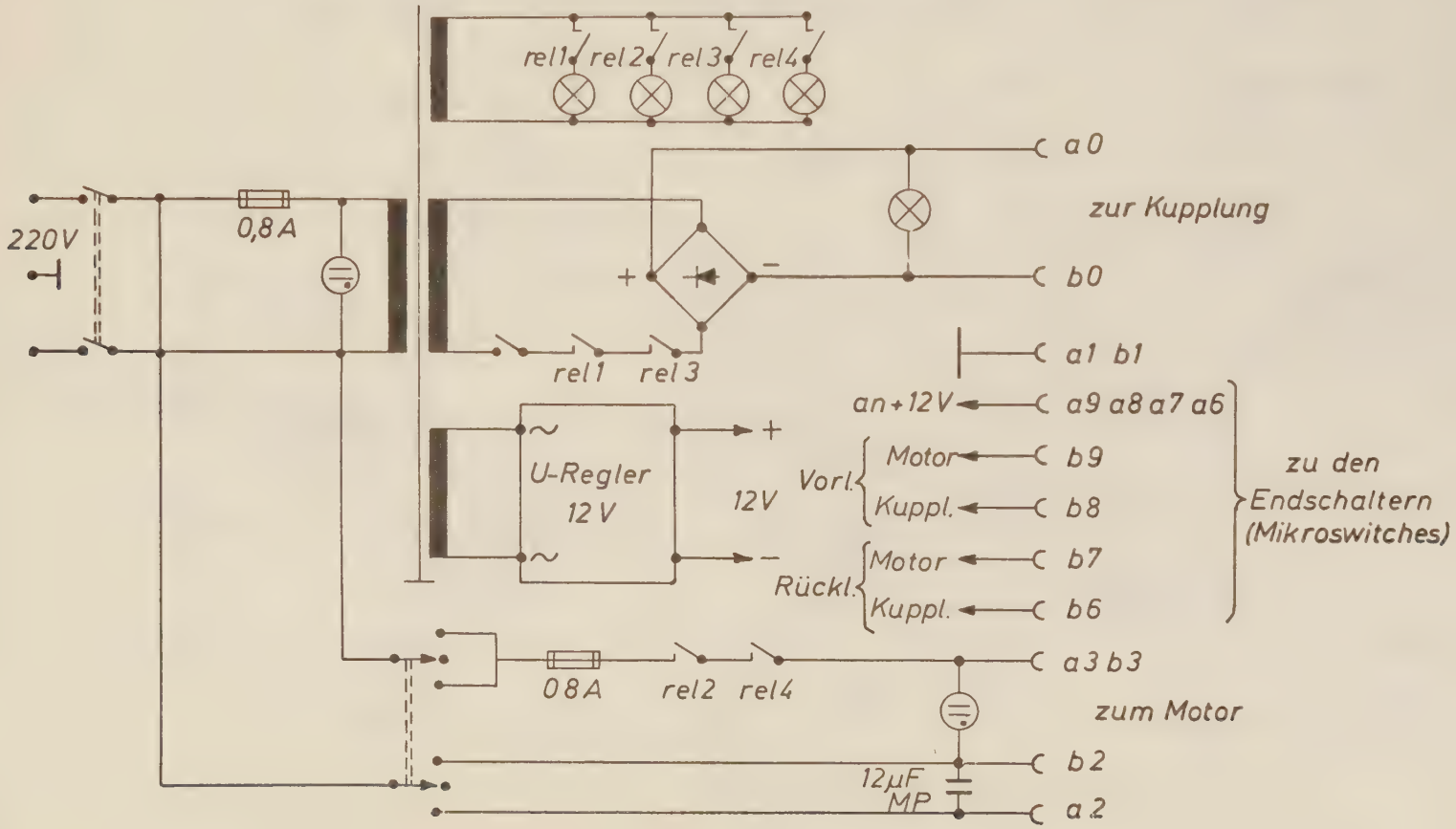
Generator für Austast-und Triggerimpuls (AXT1)



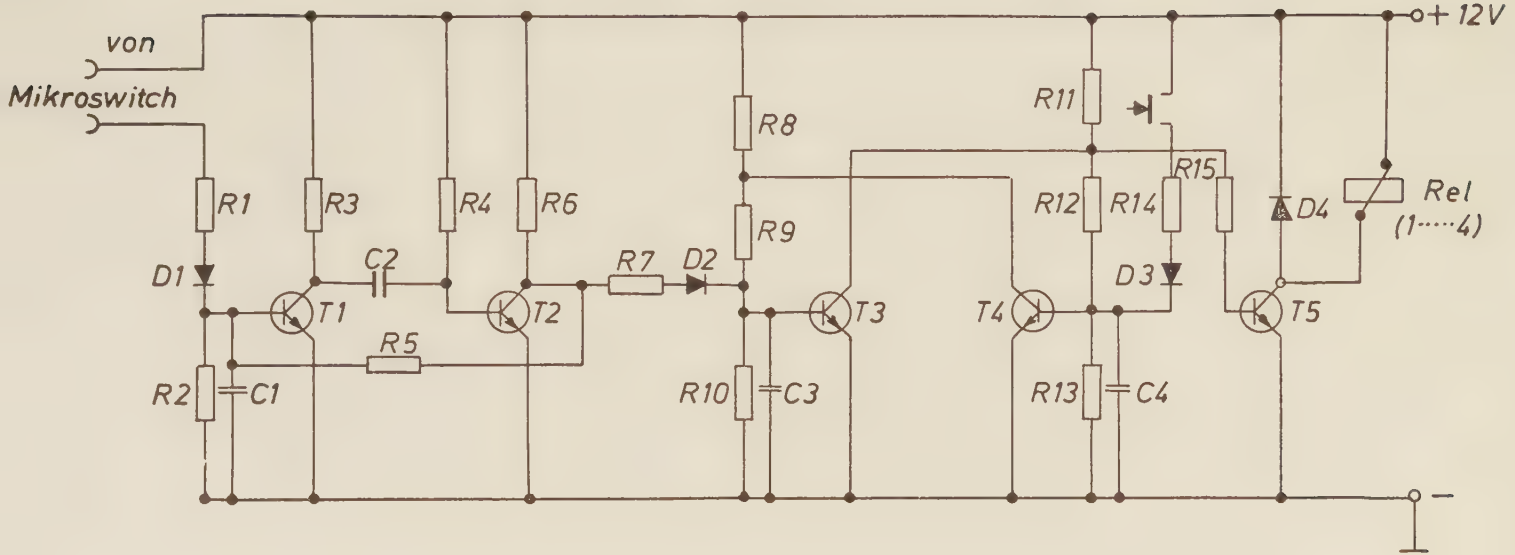
Stromkonstanter Verstärker (X3=Y1)



Steuerung für Motoren und Kupplung (MK1)



Vorlauf - und Rücklauf - Endabschaltung (VR1)



Lebenslauf

Am 12.12.1944 wurde ich als erstes Kind des Zimmermanns Wilhelm Greschner und seiner Ehefrau Wilhelmine in Schmiedshau/Slowakei geboren.

Von September 1951 bis März 1955 besuchte ich die Volksschule in Kappishäusern (Kr. Nürtingen) und anschließend das Gymnasium in Metzingen (Kr. Reutlingen), wo ich im März 1964 das Abitur ablegte. Im Sommersemester 1964 begann ich das Physikstudium an der Universität Tübingen. Im Herbst 1964 sowie im Frühjahr 1967 war ich Praktikant in der Elektronik-Firma Wandel u. Goltermann, Reutlingen. Nach der Vordiplomprüfung im Februar 1967 studierte ich zwei Semester an der Universität Hamburg. Anschließend wechselte ich wieder an die Universität Tübingen und fertigte im Institut für Angewandte Physik eine Diplomarbeit über das Thema "Fernsehgesteuerte Elektronenstrahl-Mikroaufzeichnung mit langsamer Bild-Abtastung" an. Am 8.10.1970 legte ich die Diplomprüfung ab.

Danach begann ich meine Dissertation über das Thema "Ein Elektronenstrahl-Mikroschreiber hoher Sondenstromdichte und großer Bildpunktzahl mit opto-elektronischer Analogsteuerung".

Seit April 1972 bin ich mit Brigitte Zellner verheiratet.

Meine akademische Ausbildung verdanke ich den Herren Professoren und Dozenten: Auwärter, Braunbek, Dachs, Elwert, v. Engelhardt, Gaukler, Horstmann, Jönsson, Kasper, Kneser, Krüger, Legler, Lehmann, Lenz, Mack, Meyer-Ehmsen, Möllenstedt, Mühleisen, E. Müller, M. Müller, Raether, Reimer, Rüdorff, Schief, Seiler, Sommer, Speidel, Tamaschke, Teucher, Tewordt, Wielandt, Wittern, Zeller.